Verificación de una prohibición absoluta de pruebas nucleares

Redes de instrumentos sísmicos podrían controlar, con suma fiabilidad, la prohibición absoluta de todo tipo de ensayo nuclear. Su capacidad de detección delataría inmediatamente cualquier prueba clandestina

Lynn R. Sykes y Jack F. Evernden

La firma de dos tratados negociados a lo largo de estos últimos 20 años establece los límites de los ensayos con armas nucleares. El tratado sobre prohibición restringida de los ensayos, suscrito en 1963 por más de 120 naciones, prohíbe explosiones nucleares en la atmósfera, los océanos y el espacio; se permiten las explosiones subterráneas. El tratado sobre prohibición de ensayos a partir de cierto umbral, acuerdo bilateral firmado por los Estados Unidos y la Unión Soviética, limita los ensayos subterráneos de armas nucleares a los de una potencia inferior a los 150 kilotones. Dado el actual clima de opinión a favor de un control más eficaz del armamento nuclear, se presta de nuevo atención a la idea de una prohibición absoluta de cualquier prueba nuclear. Un acuerdo de ese tipo supondría, sin duda, una medida de gran importancia. Quizá limitase el desarrollo de nuevas armas por las principales potencias y pondría freno a la transferencia de tecnología de armas nucleares a otros países.

La suspensión total de cualquier ensayo constituía la meta original de las negociaciones que concluyeron en el tratado sobre prohibición restringida de los ensayos, de 1963. En 1977, los Estados Unidos, la Unión Soviética y Gran Bretaña iniciaron nuevas conversaciones encaminadas a lograr ese viejo deseo, pero las negociaciones se rompieron en 1980. En ambos casos, el mayor impedimento para la firma de un acuerdo ilimitado fueron las reservas expresadas por los Estados Unidos y Gran Bretaña sobre la verificación del cumplimiento del tratado, pues las explosiones subterráneas suficientemente débiles escaparían a una identificación y detección segura. En julio de este año, la administración Reagan anunció que no se reanudarían las negociaciones sobre la prohibición de ensayos nucleares con la Unión Soviética y Gran Bretaña. Por la misma razón: falta de confianza en los métodos que tendrían que verificar su cumplimiento.

En 1963, cabía discutir todavía la fiabilidad de las medidas que habrían de comprobar la existencia de explosiones superiores al kilotón, prohibidas por el acuerdo. Pero hoy esa posición no se sostiene. Hablamos como sismólogos empeñados, durante muchos años, en la detección de explosiones subterráneas por métodos sísmicos y en la distinción entre una explosión subterránea y un terremoto. Estamos convencidos de que el nivel actual de conocimientos en sismología y en las técnicas de control de ondas sísmicas permite asegurar que una red adecuada de instrumentos detectaría de inmediato cualquier programa clandestino de ensayos subterráneos que abarcara explosiones de sólo un kilotón. En resumen, se dan ya las condiciones técnicas necesarias para vigilar una prohibición irrestricta de ensayos, por pequeñas que sean las explosiones muy pequeñas. Los problemas pendientes son de carácter político.

Una explosión subterránea produce vibraciones elásticas que se propagan en ondas sísmicas a través de la tierra y a lo largo de la superficie. Las ondas recorren grandes distancias; los instrumentos de registro sísmico gozan hoy de sensibilidad suficiente para captar hasta las ondas generadas por explosiones muy débiles. Detectadas las ondas, urge distinguir las señales sísmicas producidas por explosiones de las que generan los terremotos. Tarea que puede cumplir una buena red de sismómetros convenientemente distanciados.

A través de la masa sólida de la tierra, esto es, a través de la corteza y del manto, pueden propagarse dos tipos de vibraciones elásticas. Las primeras ondas que alcanzan el sismómetro son de compresión, similares a las ondas sonoras que se desplazan por el agua o el aire; su nombre en sismología es el de ondas *P* (de primarias). Las ondas más lentas por la materia sólida son las cortantes, o de cizalla, análogas a las ondas producidas en una cuerda en vibración; se denominan *S* (de secundarias). Una explosión nuclear subterránea es una fuente casi pura de ondas *P*, porque aplica una presión uniforme a las paredes de la cavidad que crea. Un terremoto, en cambio, se genera al deslizarse rápidamente dos bloques de corteza terrestre a lo largo de un plano de falla. A consecuencia de este movimiento en tijera, un terremoto emite, predominantemente, ondas *S*.

En virtud de la simetría esférica de la fuente de la explosión, todas las ondas sísmicas que genera presentan una simetría casi radial alrededor del foco de explosión. Por contra, el carácter marcadamente direccional de la fuente de un terremoto origina ondas sísmicas con dibujos muy asimétricos. La asimetría de la amplitud de las ondas registradas por los sismómetros repartidos por todo el mundo les permite a los geólogos determinar el mecanismo de falla de cualquier terremoto que se produzca.

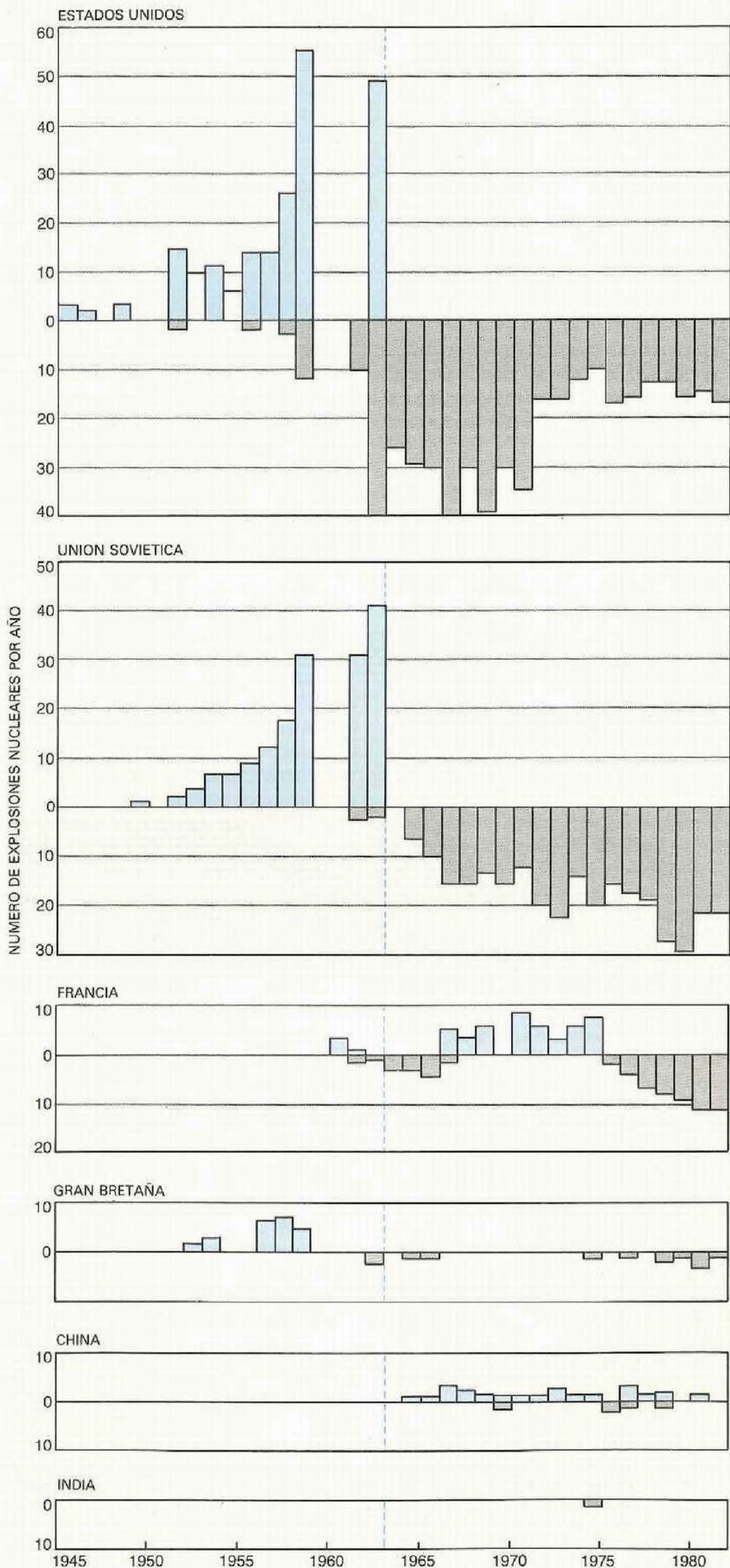
Además de las ondas *P* y *S* de la materia sólida, existen otros dos tipos de ondas sísmicas que se propagan sólo por la superficie de la tierra. Se trata de las ondas Rayleigh y Love. Proceden de reflexiones complejas de parte de la energía que portan las ondas de los estratos superiores de la corteza terrestre. Una simple explosión genera ondas Rayleigh, pero no ondas Love; un terremoto las genera de ambos tipos.

Los sismólogos determinan el calibre de un fenómeno sísmico a través de va-

rias magnitudes. A cada seísmo se le asignan diversos valores, atendiendo cada uno a un tipo distinto de onda sísmica. Se entiende por magnitud el logaritmo de la amplitud de un determinado tipo de onda, normalizado para la distancia y la profundidad del foco. De las diversas magnitudes que pueden definirse en un seísmo nos ocuparemos aquí de sólo dos, las que en notación sismológica se expresan por M_S y m_b. La primera suele basarse en ondas Rayleigh de 20 segundos de período, la segunda en ondas *P* de un segundo. La magnitud de la señal sísmica se relaciona, en última instancia, con la energía liberada en el lugar donde se genera. En una explosión nuclear suele medirse la energía liberada en kilotones (un kilotón es la energía que libera la detonación de 1000 toneladas de TNT).

Todos los años se producen numerosos terremotos cuyas magnitudes se sitúan en la categoría que corresponde a las explosiones subterráneas. Son varios los métodos aplicables a las ondas sísmicas para discriminar entre ellas cuáles nacen de una explosión y cuáles se generan por terremoto. La localización del fenómeno sísmico y su profundidad son criterios importantes; de hecho, la inmensa mayoría de los fenómenos detectados rutinariamente pueden catalogarse como terremotos porque se producen a gran profundidad o en un lugar poco probable para una explosión. Los demás pueden clasificarse, con suficiente fiabilidad, por la cantidad de energía irradiada en los distintos tipos de ondas a diversas frecuencias.

Una poderosa herramienta de clasificación es la determinación de la latitud y longitud del fenómeno. La posición se establece registrando los tiempos de llegada de las ondas *P* de período corto a varias estaciones sismográficas repartidas por el mundo. El tiempo que tardan las ondas *P* en llegar a cada estación es función de la distancia y profundidad del foco. A partir de los tiempos de llegada, se precisa la localización de la fuente con un error absoluto inferior a 10 o 25 kilómetros, si los datos sísmicos son de alta calidad.



SIGUEN REALIZANDOSE pruebas nucleares, a un ritmo de 50 ensayos por año. Las dos potencias mundiales, Estados Unidos y la Unión Soviética, son responsables de la mayoría de ellas. Como se desprende del diagrama, el efecto principal del tratado sobre prohibición restringida de los ensayos, que se suscribió en 1963 (*línea de color divisoria*), no ha sido reducir el número de pruebas, sino llevarlas al subsuelo. Las explosiones provocadas en la atmósfera y submarinas se representan por las barras de color; la subterráneas, por barras grises.

La identificación de seísmos en el mar no encierra mayores complicaciones. Cabe suponer que la red de control de un tratado de suspensión de ensayos dispondría de estaciones hidroacústicas sencillas instaladas en las costas oceánicas y en islas de especial ubicación para medir las ondas de presión en el mar. La señal hidroacústica de una explosión submarina difiere tanto de la que genera un terremoto, y puede detectarse en un margen tan amplio, que la discriminación de un fenómeno sísmico marino como terremoto o explosión es inmediata e inequívoca. Por tanto, cualquier episodio localizado al menos 25 kilómetros mar adentro (margen que se deja a los errores) puede catalogarse como terremoto por su ubicación y el carácter de su señal hidroacústica.

Se ha estimado con qué precisión puede determinarse la localización de un fenómeno sísmico en el mar de un arco de islas. Se instaló para ello una serie de sismómetros en los fondos marinos de la península de Kamchatka y de las islas Curiles, en la Unión Soviética. Los ensayos revelan que la precisión de una red sismográfica supera con mucho, en esas circunstancias, los 25 kilómetros. Tomando ese valor como referencia, se descubre que bastante más de la mitad de los temblores ocurren en el mar y, por tanto, es fácil identificarlos como movimientos sísmicos.

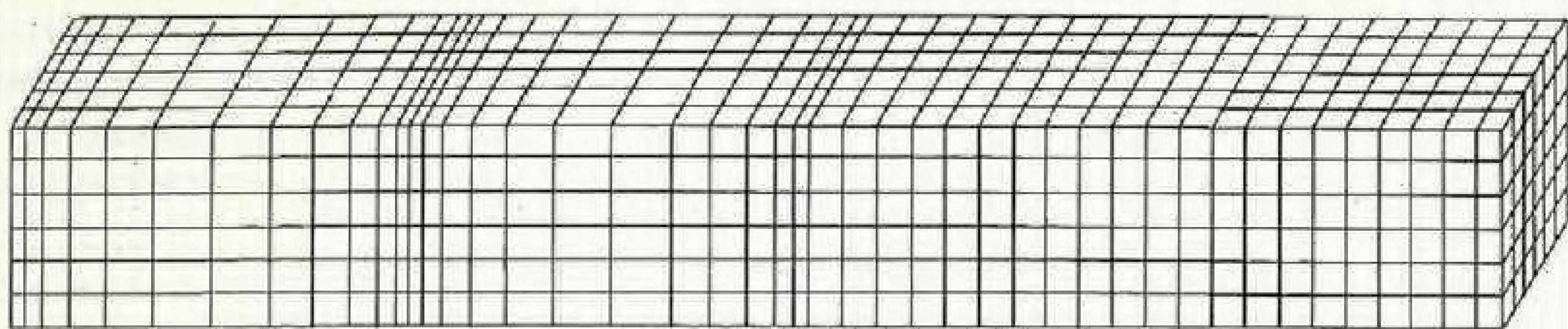
Otro grupo nutrido de fenómenos detectados tiene sus epicentros en tierra, en zonas donde no cabe esperar que se produzcan explosiones. También esos fenómenos pueden catalogarse sin miedo a errar entre los terremotos. La verdad es que casi toda la actividad sísmica mundial se concentra en regiones carentes de interés para el control del cumplimiento de una suspensión absoluta de pruebas nucleares. Por tanto, la mera localización de los fenómenos sísmicos descubre ya que la mayoría de ellos son terremotos.

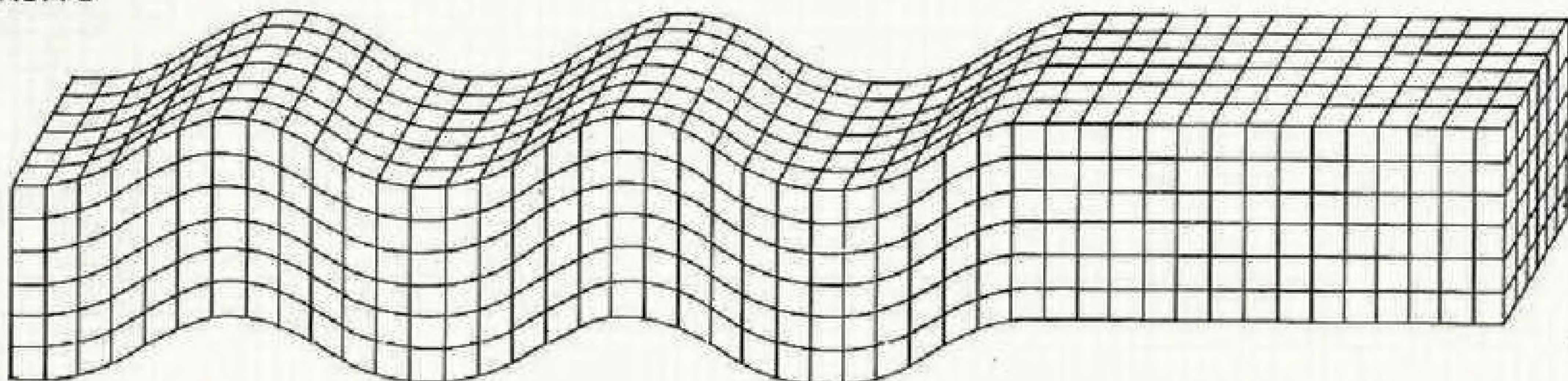
El cálculo de la profundidad del foco nos va a decir dónde encuadrar un buen número de los temblores restantes. Del 55 al 60 por ciento de los terremotos que ocurren en la tierra se producen a profundidades superiores a los 30 kilómetros; un mínimo de un 90 por ciento de ellos tiene el foco a más de 10 kilómetros de profundidad. Cualquier fenómeno sísmico situado por debajo de los 15 kilómetros es, sin duda, un terremoto. Nadie ha perforado aún la corteza terrestre hasta los 10 kilómetros; las explosiones nucleares más profundas de que se tenga noticia han detonado a unos dos kilómetros.

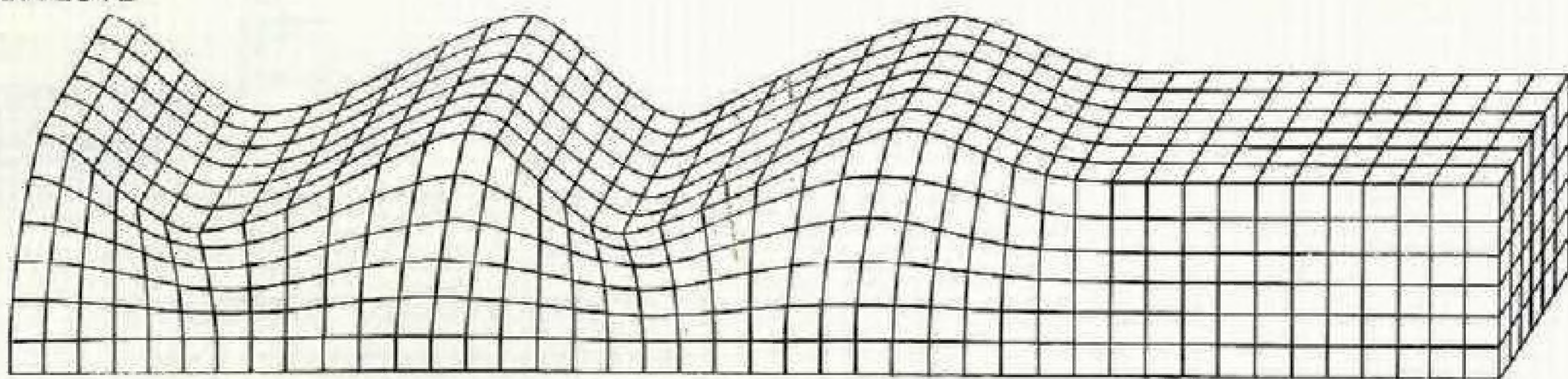
Son varios los procedimientos sismológicos a emplear para determinar la profundidad del foco de un episodio. En la mayoría de los casos se mide hondura y localización, a un tiempo. Si un seísmo se detecta en 20 o más estaciones, la estimación de una profundidad de 30 kilómetros o más, calculada por un procedimiento rutinario, asegura, con un nivel de confianza del 95 por ciento, que el fenómeno se produjo al menos 15 kilómetros suelo adentro.

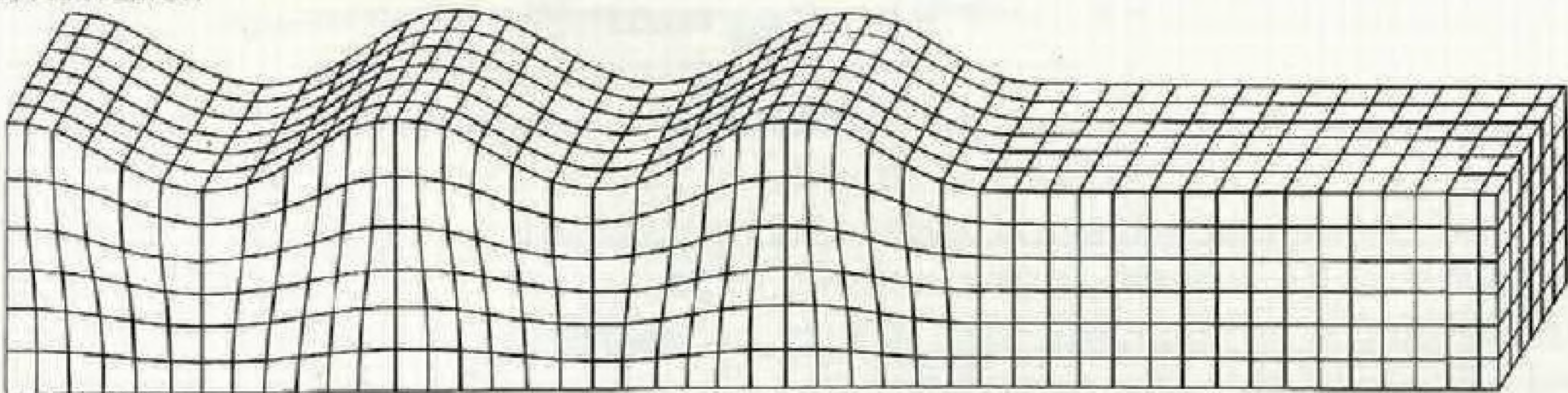
Puede aplicarse una poderosa técnica para estimar la profundidad si hay una estación sismográfica a escasos centenares de kilómetros del fenómeno detectado. (Una red de control del cumplimiento de una prohibición total de ensayos reuniría sin duda estas características en las zonas de presumible experimentación.) Un par de ondas *P* y *S* generadas simultáneamente y registradas en una estación próxima al fenómeno, aunque siguen igual camino, se propagan a distinta velocidad. La diferencia en sus tiempos de llegada, o lo que es lo mismo, la diferencia de sus fases, permite precisar el momento en que se produjo el fenómeno. El experto sabe analizar los sismogramas de la estación cercana al seísmo hasta el punto de detectar un par, al menos, de las fases de *P* y *S*. Conocidos así el momento de origen y los tiempos de llegada de las ondas *P* a unos cuantos receptores lejanos, podremos deducir un cálculo fidedigno de la profundidad del foco.

Cabe que, a pesar de todo, queden regiones sísmicas importantes sin ninguna estación próxima a ellas. En esa hipótesis, se echará mano de los datos de los fenómenos de mayor alcance para refinar el cálculo de la profundidad y localización de los episodios menores. En esencia, la técnica consiste en corregir los tiempos observados en los fenómenos débiles a partir de las diferencias









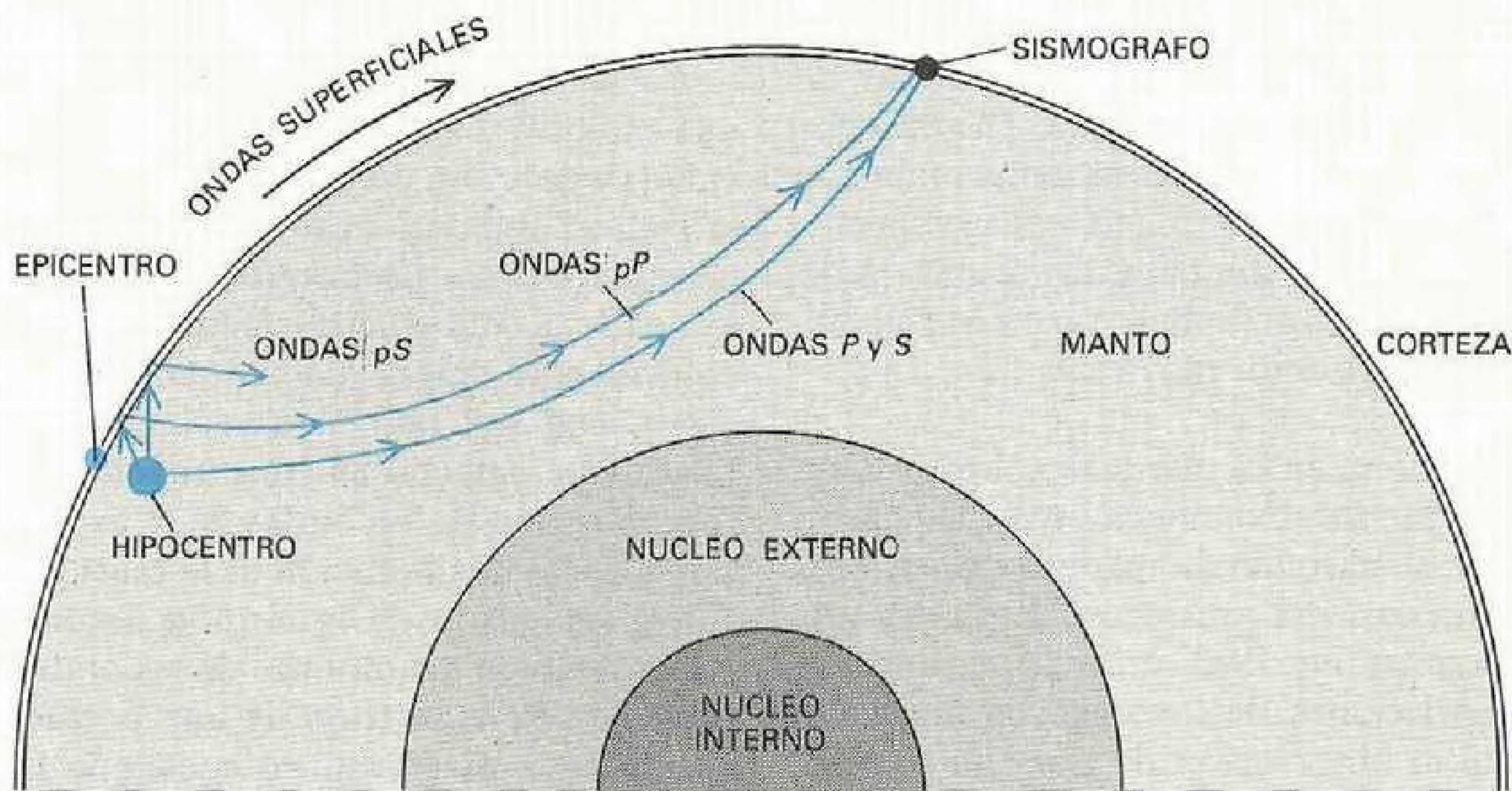
CUATRO TIPOS DE ONDAS SISMICAS. Las dos primeras, empezando por arriba, se propagan a través de la franja sólida de la tierra; las dos inferiores lo hacen sólo cerca de la superficie. Las ondas de compresión, llamadas ondas *P* (de primarias) son las que viajan más deprisa y las que antes llegan al sismógrafo; predominan en la explosión subterránea. Más lentas, las ondas *S* (de secundarias) vibran en un plano transversal a su dirección de propagación y constituyen el tipo dominante entre las producidas por un terremoto. Las ondas superficiales se dividen en dos tipos: ondas Rayleigh y ondas Love. Débense ambas a reflexiones complejas de las ondas *P* y *S* en las capas superiores de la corteza terrestre.

que presentan los tiempos estimados y observados en fenómenos de gran potencia en la misma zona. Varias redes utilizan ya este procedimiento.

Es impresionante la solidez que manifiesta la determinación simultánea de la profundidad y la localización a la hora de distinguir entre explosiones y terremotos. Más del 90 por ciento de todos los terremotos ocurren bajo los océanos o a más de 30 kilómetros de profundidad (o ambas cosas a la vez). La mayoría de los terremotos restantes no ofrecen interés, pues se producen en países donde no resultan verosímiles las pruebas nucleares o en naciones donde sería imposible un ensayo clandestino. Para Europa y los Estados Unidos, la Unión Soviética constituye, desde luego, el foco de mayor interés. Un 75 por ciento de los temblores que sacuden el territorio soviético o sus aledaños se localizan en la parte oriental del estado, en las proximidades de la península de Kamchatka y de las islas Curiles. La práctica totalidad de los seísmos de esas zonas presentan una profundidad focal superior a los 50 kilómetros u ocurren muy lejos de las costas. Los episodios cuya posición se sitúa en tierra firme o en los primeros 25 kilómetros costeños, y cuya profundidad estimada es inferior a los 50 kilómetros, apenas suponen el 0,5 por ciento de los terremotos mundiales. Lo que suma unos 100 seísmos al año de una magnitud m_b superior a 3,8. En estos casos hay que valerse de otros discriminantes sísmicos.

Ninguna de las medidas comentadas hasta ahora se funda en la naturaleza de las ondas irradiadas por terremotos y explosiones. Pero hay varios discriminantes de gran potencia que se basan, justamente, en los rasgos característicos; en particular, en las cantidades relativas de energía de las ondas de distintos tipos y períodos. Un terremoto somero genera ondas Rayleigh de 20 segundos, cuya amplitud es varias veces superior que las de las ondas procedentes de una explosión que desprende la misma cantidad de energía. En la notación de uso en sismología, la relación entre ambas magnitudes se expresa en forma cociente M_S/m_b: razón entre ondas de período largo y ondas de período corto.

Un segundo discriminante del espectro se basa en la observación de que las ondas *P* y *S* de largo período rara vez, o nunca, van asociadas a explosiones; pero los simómetros detectan una u otra, de forma rutinaria, en la mayoría de los terremotos cuya onda *P* de un segundo tiene una magnitud de al menos 4,5. En las estaciones sismográficas mejor dotadas, y aplicando a la señal análisis más elaborados, puede rebajarse la magnitud a la que se detectan.



MOVIMIENTOS DE LAS ONDAS SISMICAS esquematizados en un corte transversal de la tierra. Las ondas interiores de un terremoto o de una explosión viajan a través de la corteza y el manto siguiendo caminos curvados, rotulados aquí por *P, S, pP* y *pS*. Una onda *pP* es una onda de compresión que se produce por la reflexión de otra *P* en la superficie de la tierra, encima mismo del temblor o la explosión; una onda *pS* es una onda cortante que se produce de la conversión de parte de la energía de compresión, de una onda *P* dirigida hacia arriba, en energía transversal cuando la onda *P* se refleja en la superficie. Las ondas superficiales –las de Rayleigh y las de Love– disminuyen rápidamente en amplitud a medida que aumenta la profundidad. Se llama hipocentro al foco de un terremoto o de una explosión de donde radian las ondas. Y epicentro al punto de la superficie que queda por encima mismo del hipocentro.

Una tercera razón de distinción. Las ondas superficiales de tipo Love se generan con una intensidad muy superior en los terremotos poco profundos que en las explosiones subterráneas, incluso en el caso de explosiones de inusual fuerza. Y otra característica todavía de la onda sísmica que generan las explosiones: el primer movimiento de la tierra que estimulan las ondas *P* es siempre hacia arriba, porque la explosión se dirige siempre hacia fuera; el primer movimiento que produce una onda *P* nacida en un terremoto puede ser tanto hacia arriba como hacia abajo.

Un importante factor que contribuye a la diferenciación de terremotos y explosiones en los diagramas M_S/m_b es que las ondas *P* de las dos clases de fenómenos muestran distintas distribuciones de radiación. Las explosiones emiten ondas *P* de período corto por igual en todas direcciones, mientras que los terremotos tienen distribuciones muy asimétricas. De ahí que la mayoría de las fuentes de terremotos presenten un decrecimiento de 0,4 a una unidad de magnitud respecto de los valores máximos, al promediar, sobre ángulos de radiación adecuados, las amplitudes de la onda *P*. Una simple explosión no radia, en principio, ondas de corte; por contra, los terremotos generan grandes ondas de corte. En consecuencia, las ondas Rayleigh que se generan en muchos tipos de terremotos ofrecen una amplitud mayor que las correspondientes ondas generadas por explosiones subterráneas del mismo m_b.

La fuente de un fenómeno sísmico tiene un tiempo de formación característico; equivale a la dimensión máxima de la fuente dividida por la velocidad de formación de ésta. En los terremotos, la dimensión de la fuente corresponde a la longitud de la fractura donde se libera la mayor parte de la energía de período corto; es de tres a 20 veces mayor, según el estado de tensión de la roca, que el radio de la cavidad y la zona aplastada de una explosión parangonable. La velocidad de formación de una fuente de terremotos varía desde un valor levemente menor a otro mucho menor que la velocidad de las ondas de corte en las rocas que rodean la falla; la velocidad principal en las explosiones es la de las ondas de choque en las rocas, que viene a ser la velocidad de las ondas de compresión. Consecuencia de estas diferencias en el tamaño de la fuente y velocidad de su formación es que los tiempos característicos de terremotos y explosiones difieren en un factor de seis a 40. No sorprende, por tanto, que se aprecien diferencias entre los espectros de ondas *P* de período corto de los terremotos y las explosiones.

De la observación de varias explosiones norteamericanas se deduce la existencia de un fenómeno denominado sobredisparo (*overshoot*). Guarda relación con las ondas de choque en rocas duras, pero puede imaginarse como el equivalente al aumento de la presión de la cavidad hasta niveles altos seguido de un descenso de la presión en un fac-

tor de cuatro o cinco; se mantiene entonces, durante bastantes decenas de segundos, la presión baja. El sobredisparo, de ocurrir, proporciona un nuevo motivo de discriminación en el espectro de ondas *P*; aumenta, asimismo, la diferencia a través de la razón M_S/m_b para los episodios mayores.

Se creía antes que las explosiones no provocaban ondas Love. Un hecho que obstaculizó de manera decisiva los esfuerzos del presidente Kennedy por alcanzar en 1963 una suspensión sin restricciones de los ensayos nucleares fue la observación de que, en muchas explosiones subterráneas realizadas por los Estados Unidos en Nevada, en particular las detonadas en rocas duras, generaban unas ondas Love inconfundibles. El fracaso del criterio cualitativo "No hay ondas Love en las explosiones" (en un momento en que criterios cuantitativos como la comparación de las magnitudes de las ondas de período corto y largo ni siquiera se habían establecido de forma adecuada) quitaba a los sismólogos autoridad a la hora de defender su capacidad de distinguir entre las ondas sísmicas procedentes de explosiones subterráneas y las que generaban los terremotos.

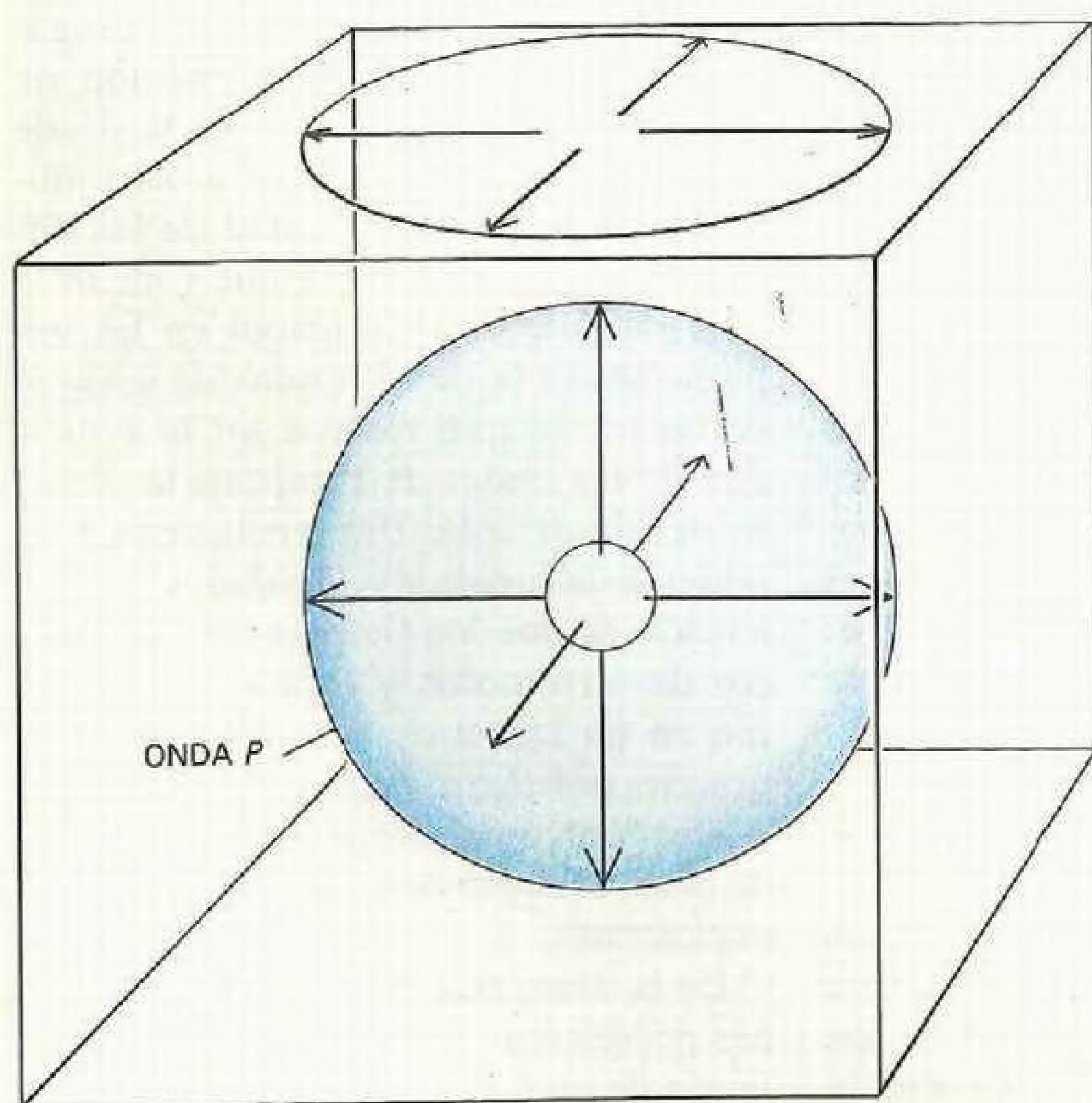
Se sabe por qué aparecieron ondas Love en los ensayos de Nevada. Los primeros análisis no consideraban el influjo del estado de tensión natural de la tierra sobre las ondas generadas por una explosión. La formación de una cavidad, y del cono de aplastamiento que la rodea, por una explosión subterránea relaja parte de la tensión natural, lo que a su vez genera ondas sísmicas equivalentes a las de un pequeño terremoto, con sus ondas Love incluidas. Las ondas detectadas constituyen una superposición de las ondas de la explosión y de las de liberación de la tensión.

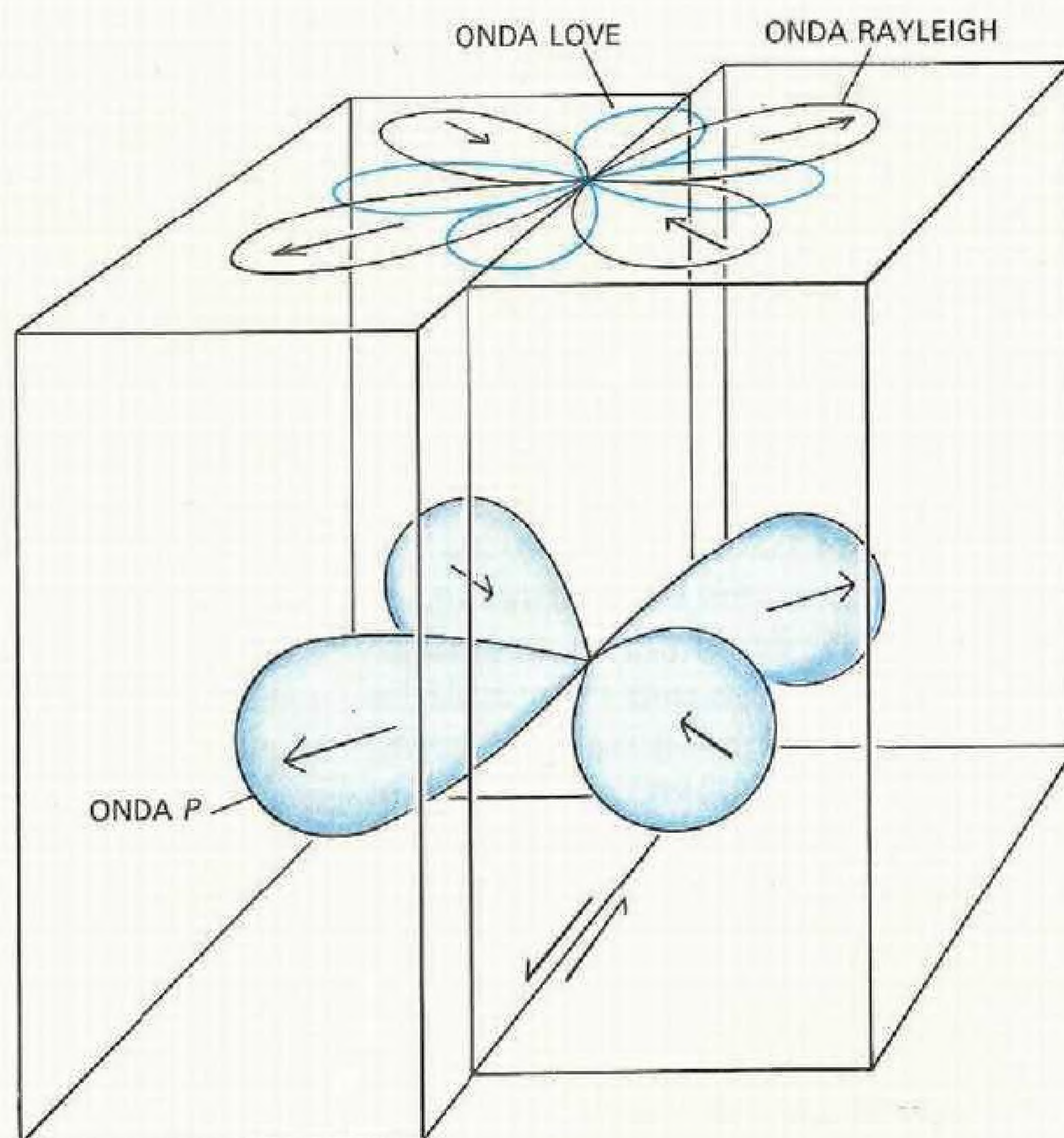
Esa relajación de la tensión natural altera también la amplitud de las ondas Rayleigh. Pero se trata de una perturbación cuya magnitud no cuestiona la naturaleza de un episodio identificado a través de la razón entre ondas de período largo y ondas de período corto. Sólo en contadas ocasiones dicha perturbación afecta, de un modo significativo, a la amplitud de las ondas *P*. Pero no se sabe que haya cambiado nunca el sentido del primer movimiento. Es más, si la magnitud M_S se determina a partir de las ondas Love, y no a partir de las Rayleigh, el método del cociente (M_S/m_b) proporciona un elemento discriminador excelente.

En pocas palabras, si los sismólogos hubieran hecho como Dios manda sus deberes en 1963, las naciones del mundo hubieran quizá firmado un tratado de prohibición irrestricta en aquel momento. Hoy, la liberación de tensiones naturales de la tierra sólo tiene significación en cuanto factor perturbador a considerar cuando se calcula el alcance de una explosión a partir de las ondas Rayleigh.

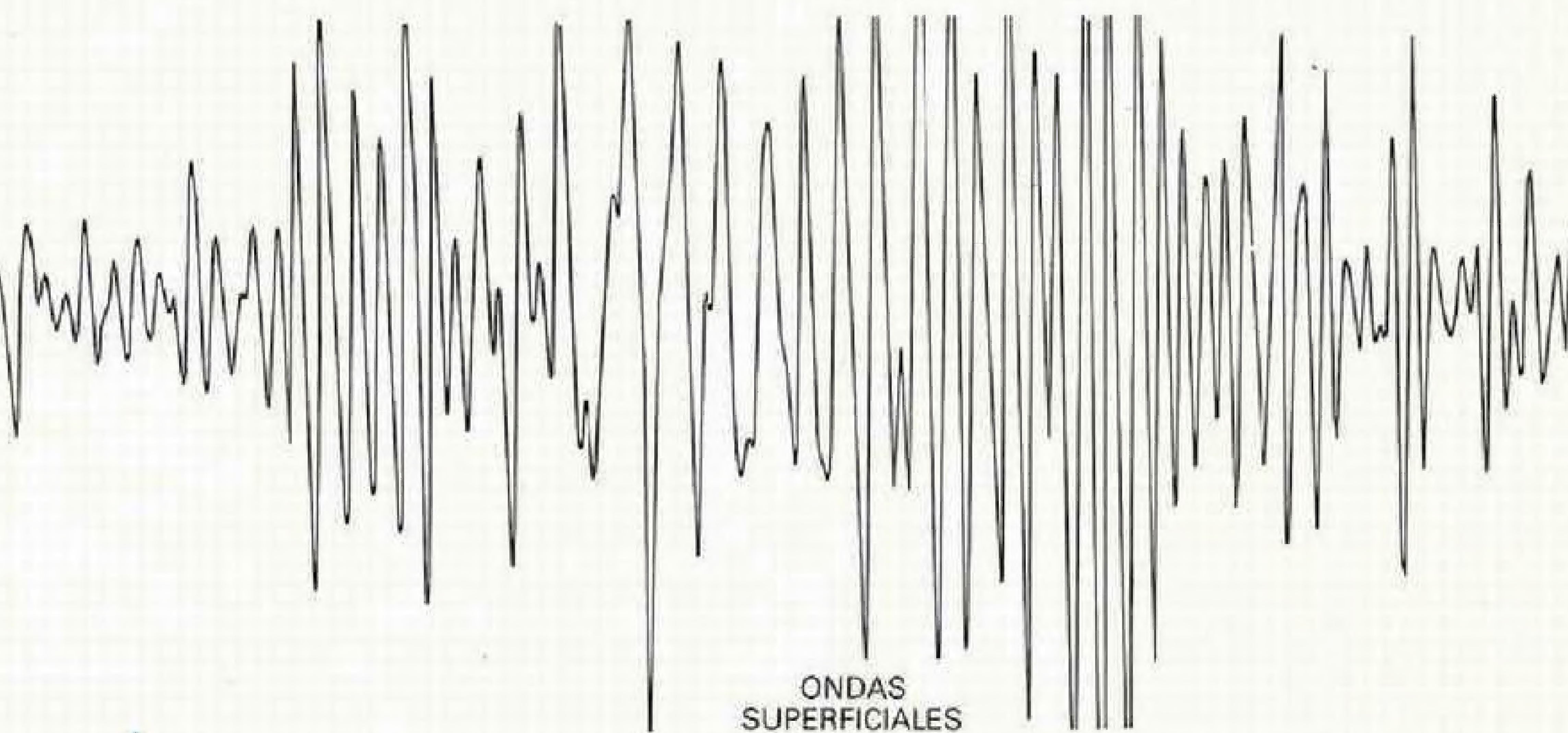
Se aducen ciertos estudios según los cuales los terremotos presentan a veces valores de M_S/m_b parecidos a los que presentan las explosiones, lo que constituiría, se argumenta, un factor que podría impedir un control eficaz de una suspensión absoluta de las pruebas nucleares. Tras analizar gran número de terremotos ocurridos por todo el mundo y de explosiones subterráneas provocadas en los Estados Unidos y en la Unión Soviética, sólo hemos hallado un ejemplo de ese tipo de ambigüedad. El foco del fenómeno se hallaba lejos de la zona donde la red sismográfica ofrece los mejores resultados.

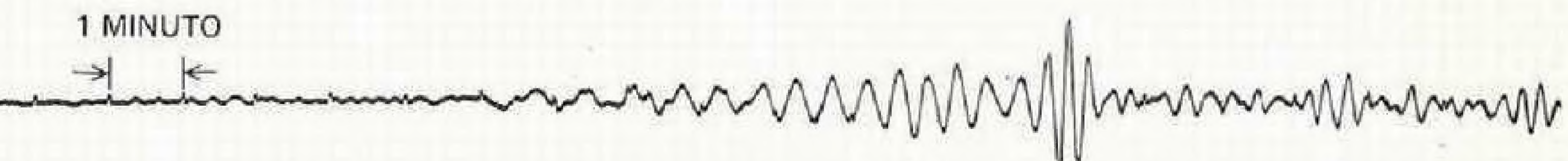
En 1972, en una reunión del Comité de Desarme de las Naciones Unidas, los Estados Unidos presentaron una lista de 25 fenómenos "anómalos" que constituirían otros tantos problemas de discriminación. En 1976, uno de nosotros (Sykes) reanalizó los 25 casos en colaboración con otros dos sismólogos. Robert Tathum y Donald Forsythe. Se dedujo que la mitad, más o menos, de los episodios presentaban valores M_S/m_b que los catalogaban sin ambages entre los terremotos. La mayoría de las magnitudes originales se habían calcu-





FIGURAS DE RADIACION de las ondas *P* producidas por una explosión subterránea (*izquierda*), comparadas con las que origina un terremoto (*derecha*). El primer movimiento de las ondas *P* nacidas en una explosión procede uniformemente hacia fuera, de ahí que se observe como un desplazamiento hacia arriba en todas las estaciones sísmicas. El primer movimiento de las ondas *P* causadas por un terremoto procede hacia fuera en algunas direcciones y hacia dentro en otras. El dibujo de las ondas de superficie depende de la orientación del plano de la falla del terremoto. En el caso bastante simple de una falla vertical con deslizamiento, el que se recoge en esta ilustración, los cuatro diagramas de radiación lobuliformes que se observan en la superficie para las ondas *P* y Rayleigh son la proyección de la configuración tridimensional de las ondas *P* que arranca del hipocentro del episodio. El diagrama de radiación de las ondas Love emitidas por la misma fuente está girado 45 grados en relación con los diagramas de las ondas *P* y las ondas Rayleigh.





SISMOGRAMAS DE ONDAS DE LARGO PERIODO procedentes de un terremoto ocurrido en el Artico, cerca del territorio soviético (*parte superior*) y de una explosión subterránea dentro de la frontera rusa (*parte inferior*), tal como se registraron en la estación sísmica de Elath (Israel), equidistante, más o menos, de los focos de uno y otro suceso. Las ondas de corto período generadas por ambos episodios venían a coincidir en su magnitud. Por contra, la magnitud de las ondas Rayleigh de largo período registradas en los diagramas son mucho mayores para el temblor de tierra que para la explosión. La relación entre las ondas de largo período superficiales y las de corto período del interior se ha convertido en un criterio fiable para distinguir las ondas sísmicas de los terremotos de las que proceden de una explosión nuclear. Añádase, además, que la onda *P* de la explosión tiene más energía de alta frecuencia que su homónima del terremoto. La onda *S* del temblor es grande; pequeña, la de la explosión nuclear, motivo por el cual cuesta apreciarla en el sismograma.

lado a partir de los registros de sólo una estación o dos; ni siquiera se había consultado gran parte de la información disponible. Al examinar los registros de otras estaciones, los fenómenos perdieron su carácter "anómalo".

Las mediciones M_S/m_b basadas en ondas Rayleigh de 20 segundos dieron, para los restantes casos problemáticos, valores que caían en el margen característico de los terremotos. Varios episodios se situaban a profundidades de 25 a 50 kilómetros, donde puede excluirse en todo caso la práctica de ensayos nucleares; pero aún así había que dar explicación del cociente de magnitudes. Se sabe en teoría sismológica que ciertos tipos de terremotos, a esas honduras, son pobres en ondas Rayleigh de período largo. Sin embargo, también predice la teoría que habitualmente se generan con gran intensidad, en esas circunstancias, ondas Love y vibraciones denominadas ondas Rayleigh de frecuencia más alta. El análisis de los registros de ondas Love y de ondas Rayleigh de frecuencia más alta permitió incluir varios casos problemáticos más entre los terremotos.

Quedaba por resolver una secuencia de fenómenos ocurrida en el Tibet. No es probable que se realicen pruebas nucleares en esa zona, pero no podía determinarse con exactitud la naturaleza de los hechos a partir de la razón de magnitudes. A nuestro entender, hay que buscar la explicación en que la red sismográfica empleada en el decenio de 1960, de cuando data el caso, carecía de la dotación necesaria para registrar ondas Love en los episodios de escala pequeña, ya que los enmascaraba el ruido de fondo de la tierra. Las nuevas instalaciones y métodos de tratamiento de los datos han reducido enormemente el problema. Si ocurriera una serie de temblores iguales o similares en la actualidad, creemos, se identificarían sin ambigüedad. Los sismógrafos de período largo ubicados en perforaciones, y el tratamiento digital rutinario de los sismogramas, suprimen el ruido de fondo e incrementan la detectabilidad de muchos tipos de ondas, las Love incluidas.

Como era de esperar, la incógnita tibetana se despejó, a pesar de la pobreza de los datos de período largo. En varias estaciones, el primer movimiento de las ondas *P* era hacia abajo, lo que nunca puede corresponder a una explosión. Debía tratarse, pues, de pequeños terremotos.

Parece razonable afirmar que, para las redes que describiremos más adelante, no tendrían que representar problema alguno los fenómenos de un m_b de magnitud 4 o superior. No sabemos de ningún terremoto euroasiático con una onda *P* de un segundo de magnitud 4 o superior, ocurrido en los últimos 20 años, cuyas ondas se hayan clasificado desencadenadas por una explosión. (Obviamente, muchos terremotos euroasiáticos de escala menor quedaron sin identificar por la imperfección de los datos.) Más aún, que nosotros conozcamos, ni una sola explosión nuclear subterránea de los centenares detonados durante ese mismo período radió ondas sísmicas que pudieran confundirse con las de un terremoto. Nuestra experiencia concede una probabilidad extremadamente baja a que un fenómeno quede sin identificar, si se aplican todas las técnicas de discriminción disponibles.

No hay técnica de control que ofrezca la completa seguridad de que hasta la menor de las explosiones clandestinas pueda detectarse. Suponemos que sería adecuada una capacidad de detección e identificación de fenómenos cuya magnitud sísmica equivaliera a una potencia explosiva de alrededor de un kilotón. Suele considerarse que, para que los Estados Unidos suscriban la suspensión de todas las pruebas nucleares, se requeriría un nivel de confianza del 90 por ciento de detección de cualquier violación por parte del otro firmante del acuerdo. Sin embargo, el desarrollo de una nueva arma nuclear requiere normalmente una serie de ensayos, y la probabilidad de detectar al menos alguna explosión aumenta drásticamente a medida que se incrementa el número de pruebas. Quizá tampoco sea necesario un nivel de confianza del 90 por ciento de detección de una explosión aislada. Un país que pretendiera violar el tratado tendría que considerar una probabilidad de que se detecta-

ra su explosión inferior al 30 por ciento, y seguramente mucho menor, aun si sólo planeara un ensayo clandestino. Los posibles acuerdos de prohibición puestos hasta ahora sobre el tapete incluyen una "cláusula de escape" que permite a cualquier país renunciar a las obligaciones que prevé el tratado. A menos que la probabilidad de detección fuera muy baja, un estado que, por interés nacional, decidiera reanudar las pruebas invocaría seguramente la cláusula de escape antes de arriesgarse a una denuncia por violación.

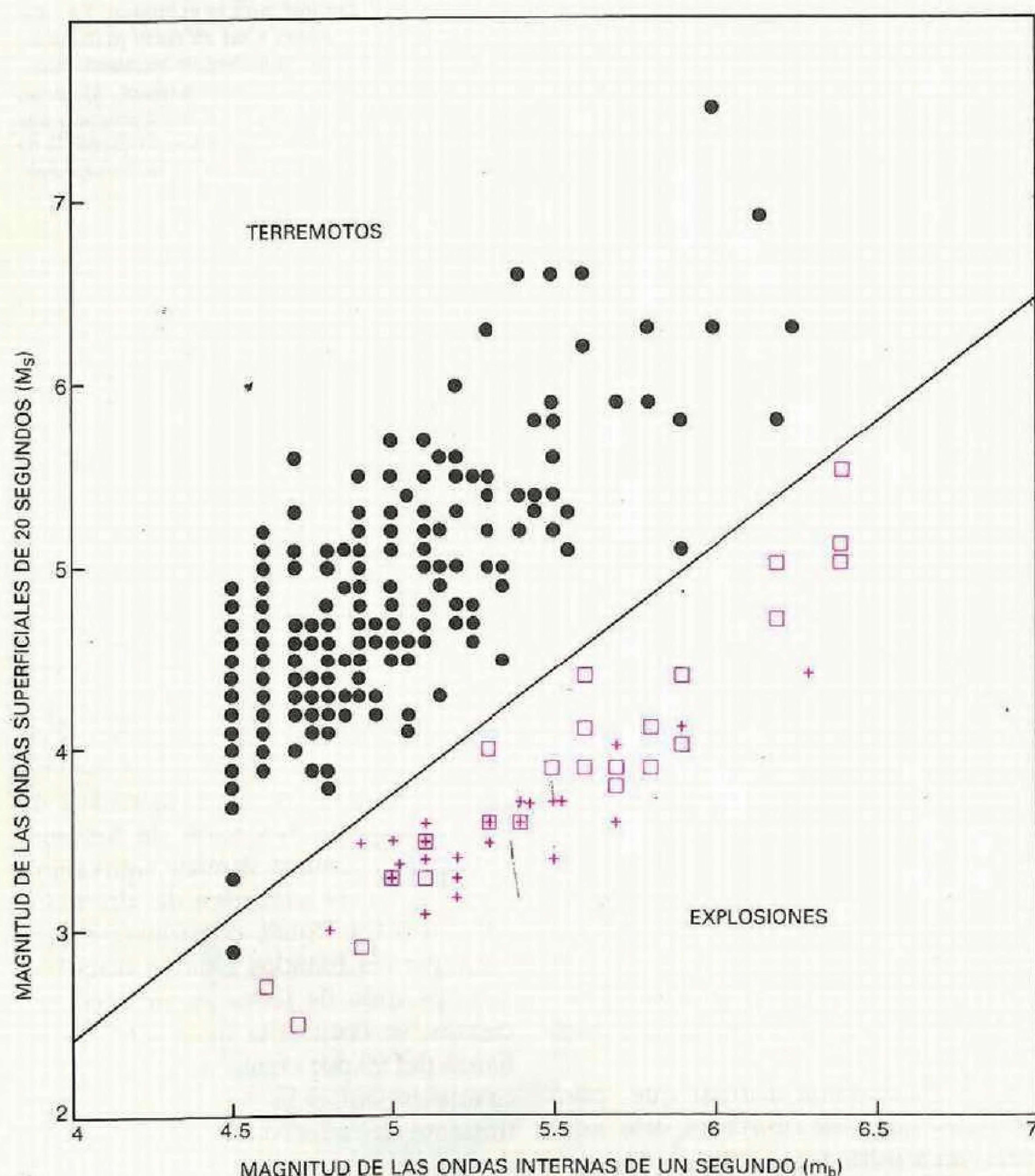
A tenor de los niveles de fiabilidad que puede alcanzar un sistema de control, podemos especificar el tamaño y la sensibilidad de la red sismográfica necesaria para verificar el cumplimiento de una suspensión ilimitada de las pruebas. Cabe considerar dos tipos de red para mantener una vigilancia sísmica de la Unión Soviética. Uno comprendería 15 estaciones situadas fuera de las fronteras de Rusia. En el segundo, esas 15 estaciones se complementarían con otras 15 tendidas por el interior.

El umbral de detección de las señales sísmicas viene impuesto por los microsismos, o vibraciones aleatorias de la superficie terrestre. La mayoría de esas sacudidas vienen inducidas por la atmósfera y los océanos. Para detectar explosiones de un kilotón en gran parte del territorio soviético, la red de control habría de poder distinguir, del ruido de fondo, cualquier fenómeno con una onda P de período corto de magnitud 3,8 o superior. Para separar una explosión de un terremoto mediante la comparación de la magnitud de período largo con la de período corto, la red habría de detectar ondas superficiales con una magnitud M_S de 2,5 o superior. La red exterior de 15 estaciones lo lograría. De hecho, dado que casi todas las zonas sísmicas de la Unión Soviética se sitúan a lo largo de sus fronteras, la red exterior podría captar en ese territorio episodios más débiles incluso. La mera detección de un fenómeno sísmico en la mayoría de las zonas interiores obligaría a catalogarlo entre las explosiones.

El hecho de establecer el límite inferior de un kilotón en la potencia de una explosión que pudiera detectarse con una red exterior descansa en el supuesto de que el acoplamiento entre la explosión y la radiación sísmica es eficaz y que la explosión no se produce contemporánea o inmediatamente después de un terremoto importante. Si consideramos la posibilidad de que una nación intente violar el tratado de suspensión desacoplando o amortiguando una explosión, reduciendo así la amplitud de las señales sísmicas emitidas, no habrá más remedio que mejorar la red. En principio, puede lograrse dicho amortiguamiento detonando la explosión en una gran cavidad o empleando algún material que absorba energía en una cavidad menor. La primera estratagema reduciría la señal sísmica de una explosión en 1,9 unidades de magnitud, medidas por ondas P de un segundo (es decir, mediante m_b). La segunda supondría una reducción de una unidad.

La utilización de una cavidad de grandes dimensiones es, sin duda, la alternativa más preocupante, pero sólo podría intentarse en ciertas formaciones geológicas: un domo salino o una potente secuencia de depósitos estratificados de sal. Pocas son las zonas de la Unión Soviética donde subyacen depósitos salinos para construir una cavidad capaz que permita desacoplar una explosión de varios kilotones. El tamaño máximo de una cavidad cuya construcción y mantenimiento sean factibles establece un límite de 10 kilotones a las explosiones que pudieran amortiguarse por este procedimiento y escaparan a la detección por la red exterior de 15 estaciones.

Otra forma de amortiguar la amplitud de las ondas sísmicas irradiadas es provocando la detonación en un medio de bajo acoplamiento: en un aluvión seco, por ejemplo. El espesor máximo de aluvión seco en la Unión Soviética



CLARA DISTINCION entre terremotos y explosiones por razón de la magnitud de las ondas superficiales de largo período (M_S) en función de las ondas interiores de período corto (m_b). Los 383 terremotos representados por puntos negros corresponden al conjunto de todos los episodios registrados en el mundo entero a lo largo de seis meses cuyo valor de m_b fuera igual o superior a 4,5 y cuya profundidad de foco no llegara a los 30 kilómetros. (El motivo de que aparezcan menos puntos que terremotos débese a que las magnitudes de varios de ellos coincidían.) Los cuadrados de color simbolizan las explosiones subterráneas provocadas en los Estados Unidos y, las cruces de color, las producidas en la Unión Soviética. Tan sólo un terremoto cae dentro del colectivo de las explosiones, definido por la línea recta de separación entre ambos grupos de sucesos. Dicho episodio, que ofrecía la magnitud menor de cuantos terremotos recogía el estudio, ocurrió en el sudoeste del océano Pacífico, una zona donde la sensibilidad de la red de estaciones sísmicas es más pobre que en las de la mayoría de las instaladas en el hemisferio boreal. Se han ajustado los valores m_b para introducir las variaciones regionales en la amplitud de las ondas de período corto.

establece un límite de dos kilotones a las explosiones camufladas por este método, suponiendo de nuevo que sólo se han instalado 15 estaciones exteriores.

Debe mencionarse otro posible inconveniente de la red basada exclusivamente en estaciones exteriores. Si a una misma estación llegaran simultáneamente las señales de dos o más terremotos podría originarse cierta confusión. Especial dificultad revistiría la llegada de ondas de período largo de algún fenómeno de poca magnitud, desde la Unión Soviética, junto con ondas similares de un terremoto de gran magnitud procedente de cualquier otro punto del planeta. En esas circunstancias podría resultar problemático establecer con certeza, y mediante la razón M_S/m_b, la naturaleza del fenómeno ocurrido en Rusia. Con una red de 15 estaciones exteriores habría casos, algunos por año, en los que el terremoto pequeño quedaría en territorio soviético, o hasta 25 kilómetros de sus fronteras, y a una profundidad de menos de 50 kilómetros.



COMPROBACION DE LOS METODOS empleados para distinguir entre un terremoto y una explosión. Se ensayaron aplicando dichos métodos a todos los temblores de tierra con una magnitud de 4,5 o superior que se registraron durante un intervalo de 162 días del año 1972. La muestra constaba de 948 episodios. La mayoría de ellos pudieron clasificarse como terremotos (y no como explosiones, por tanto), en virtud de su localización o su profundidad. Los restantes se discriminaron mediante comparación de la magnitud de las ondas superficiales de período largo con la magnitud de las ondas interiores de período corto (la razón M_S/m_b). Aunque, como se ve, la secuencia de aplicación de las distintas pruebas afectó al rendimiento del proceso, todos los episodios pudieron identificarse con independencia de la secuencia utilizada.

Una red de control que comprendiera 15 estaciones sismográficas fuera de la Unión Soviética y otras 15 dentro eliminaría en gran parte el problema de la coincidencia de señales de terremotos y reduciría sustancialmente la potencia a la que una explosión deja de detectarse, aun cuando se intentara desacoplarla. Las estaciones interiores de control serían sencillas y automatizadas, capaces de medir los movimientos verticales del suelo y dos componentes ortogonales del movimiento horizontal; a partir de los datos de una sola estación de corto alcance, se determinaría así la distancia y dirección de los episodios cercanos. Con semejante red, y suponiendo que se intentara el amortiguamiento aprovechando un ruido terrestre normal, la máxima explosión que llegaría al 30 por ciento de posibilidades de escapar a la detección en cualquier acondicionamiento, salvo un domo salino, sería la de 0,5 kilotones de potencia.

Por lo que respecta a los domos de sal, la zona soviética que más nos importa es la región que queda al norte del mar Caspio. Nuestra hipotética red sitúa allí tres estaciones. Pero incluso una explosión débil en una gran cavidad practicada en un domo salino emitiría ciertas ondas *P* y *S* de amplitud suficiente para detectarlas en las estaciones cercanas. Es más, la misma detección por parte de una sola estación delataría inmediatamente el carácter explosivo del episodio, ya que la zona no presenta actividad sísmica natural. En consecuencia, es poco probable que se intentara una violación de una potencia superior a un kilotón incluso en la región de domos salinos.

Una posible estratagema de violación que se ha citado de vez en cuando es la de enmascarar la señal sísmica de una explosión nuclear con la señal de un terremoto de escala elevada, que podría ocurrir por igual junto al foco de explosión o lejos del mismo. Para la Unión Soviética, la única posibilidad con visos de verosimilitud sería la del terremoto alejado, pues sólo en la península de Kamchatka y en las islas Curiles se producen esos episodios con la frecuencia suficiente para que el esfuerzo valga la pena. Y no es probable que se arriesgue allí en pruebas clandestinas, pues la zona queda exhaustivamente controlada desde estaciones ubicadas en Japón y en las islas Aleutianas. Por no mencionar los posibles sismómetros y sensores hidroacústicos de fondo oceánico a instalar cerca de la costa.

La primera defensa contra la violación por enmascaramiento de una prueba con un gran terremoto es la cuestionable viabilidad del subterfugio. A menos que el infractor dispusiera de varios puntos de ensayo, el número de oportunidades que se le presentarían cada año para acometer ensayos clandestinos sería muy bajo. Además, tendría que mantener sus armas constantemente listas para disparar. Para alcanzar la capacidad de violación que se señala más adelante habría de detonar la carga en el intervalo de los 100 segundos inmediatos tras la llegada de las ondas de período corto del terremoto. Debería estimar también la amplitud máxima y la tasa de amortiguamiento de las ondas del temblor con gran exactitud, así como prever la amplitud de las ondas *P* generadas por la explosión con una precisión de 0,1 unidades de magnitud. Aún tomando estas precauciones, el infractor tendría que aceptar una alta probabilidad de que el fenómeno lo detectara una estación de control, por lo menos, y una probabilidad menor de que lo descubrieran dos estaciones más. Debería instalar y manejar, además, su lugar de ensayo (incluida la cavidad de grandes dimensiones) y su propia red sismográfica en absoluto secreto durante años.

Frente a estas duras exigencias para una violación con éxito, los únicos requisitos que precisa el país antagonista son una red sísmica de estaciones de alta calidad y un tratamiento adecuado de los datos. Ante una red de 15 estaciones exteriores y 15 interiores que vigilan atentas, el único ardid eficaz de violación, de uno o más kilotones, requeriría a la vez desacoplar y enmascarar la señal de la explosión con un terremoto.

Las cuestiones relacionadas con el control de una prohibición absoluta de todo tipo de prueba pueden resumirse como sigue. El nivel alcanzado por la sismología y la comprobación de las redes sismográficas aseguran que el cumplimiento de un tratado se verifique con un elevado nivel de confianza. Las únicas explosiones cuya probabilidad de pasar desapercibidas valdría la pena ponderar serían las de potencia muy pequeña: menos de un kilotón si el sistema de control posee estaciones en la Unión Soviética.

Conviene abordar la cuestión de la potencia en el contexto de las armas nucleares ensayadas hasta ahora. Los tipos desarrollados en 1945, el origen

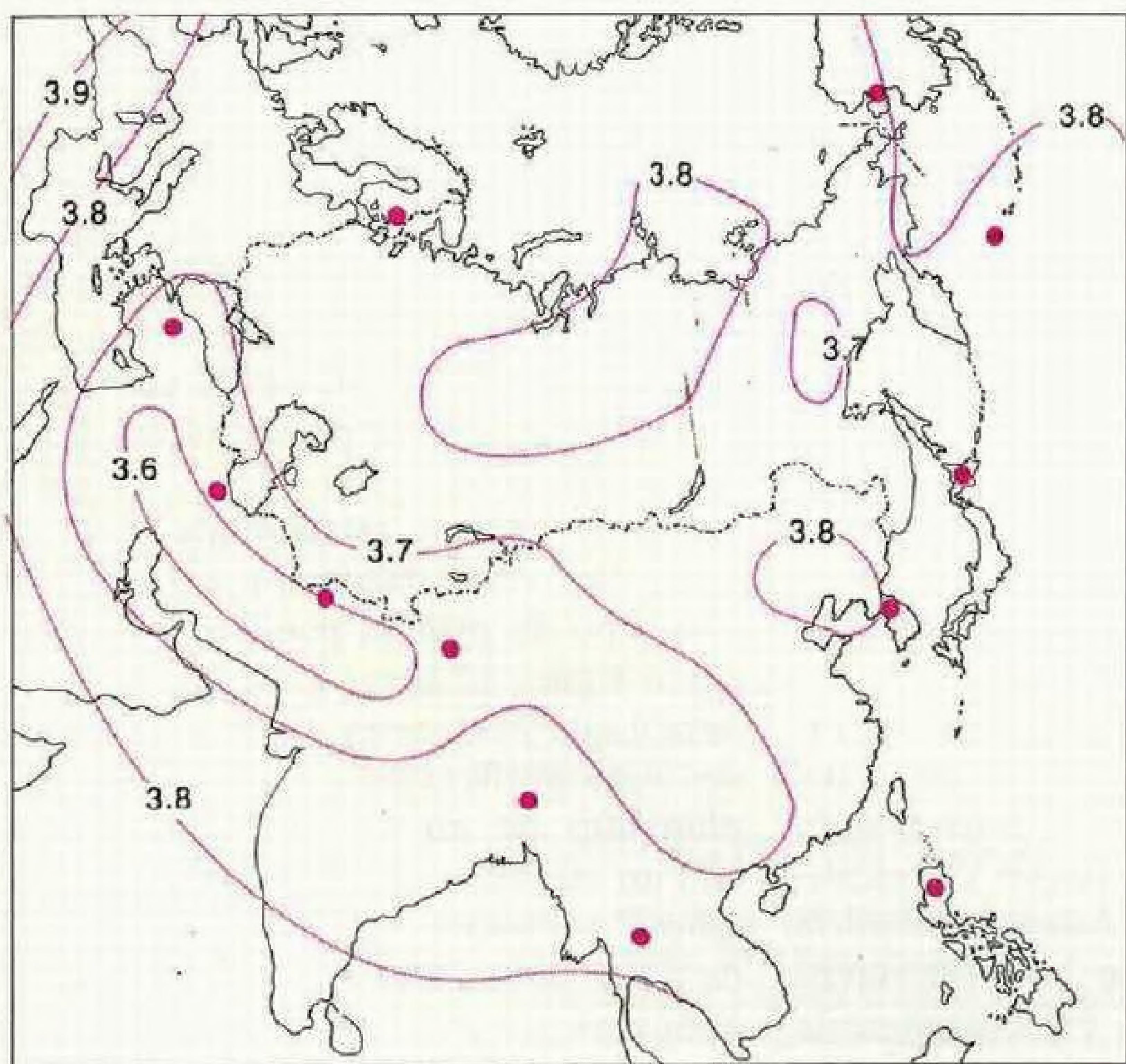
de la era nuclear, poseían una potencia de 15 a 20 kilotones. La potencia se incrementó rápidamente, hasta el punto de que Rusia ensayó en 1961 una bomba de 58.000 kilotones. La explosión subterránea de mayor potencia fue de 5000 kilotones. Los informes no sometidos a secreto oficial consideran que la potencia de los misiles intercontinentales va de los 40 a los 9000 kilotones. La potencia de las explosiones subterráneas que podrían quedar sin detectar o identificar es, por tanto, muy inferior a la de las primeras armas atómicas. Si el umbral de detección e identificación fiable es de un kilotón, ello no representa más que la 150.ª parte del límite especificado por el tratado sobre prohibición de ensayos a partir de cierto umbral, de 1976.

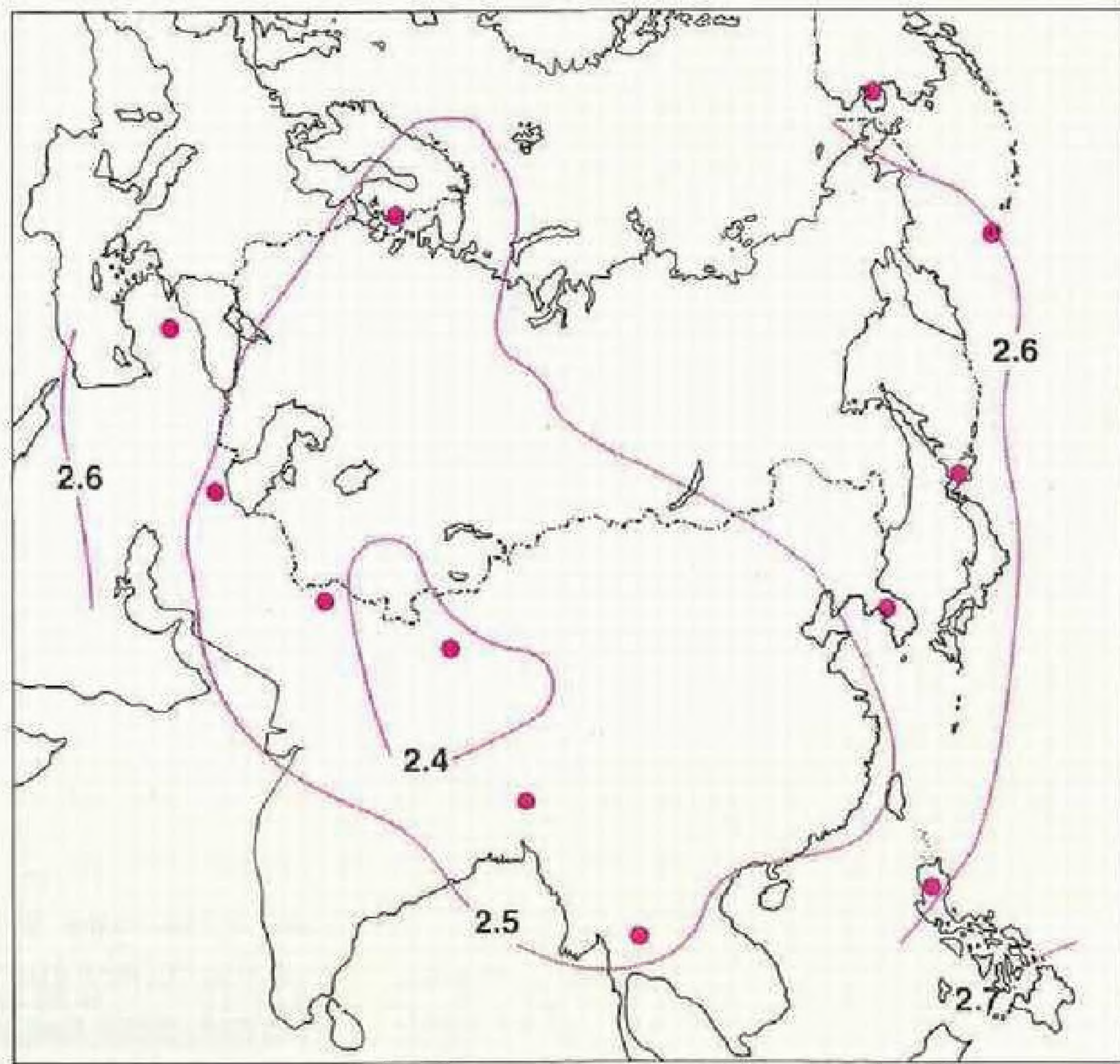
En lo que se refiere a su verificación, una prohibición irrestringida de las pruebas nucleares, para resultar eficaz, tendría que establecer un umbral muy bajo por precaución elemental de que las armas de escasa potencia podrían ensayarse ante la falta de seguridad del antagonista para detectarlas e identificarlas. El tratado debería poner el umbral cerca del límite de la capacidad de control de seísmos. La eficacia de la prohibición quedaría mejor apuntalada así que optando por un umbral excesivamente alto, el actual por ejemplo; la fuente de discordia sería la potencia exacta de los ensayos realizados en las proximidades del umbral. Indudablemente, la determinación de si se ha ensayado o no será siempre más clara y unívoca que matizar el valor exacto de la potencia probada.

En los últimos años se han divulgado informes de repetidas violaciones presumibles, por parte de la Unión Soviética, del tratado que esta nación firmara en 1976, ensayando ingenios nucleares que superaban el límite de los 150 kilotones. Se han aducido esas presuntas violaciones como razón argumental de que el tratado con limitación, no ratificado todavía por el Senado de los Estados Unidos, se escapa a una verificación fiable y, por ende, debe renegociarse. Pero si nos atenemos a nuestros propios análisis hemos de afirmar que tales informes son erróneos. Se fundan en una calibración incorrecta de una de las curvas que relacionan las magnitudes sísmicas medidas con la potencia del explosivo. Si operamos correctamente, veremos que ninguna de las pruebas soviéticas superaron los 150 kilotones, aunque varias rondaran esa cota.

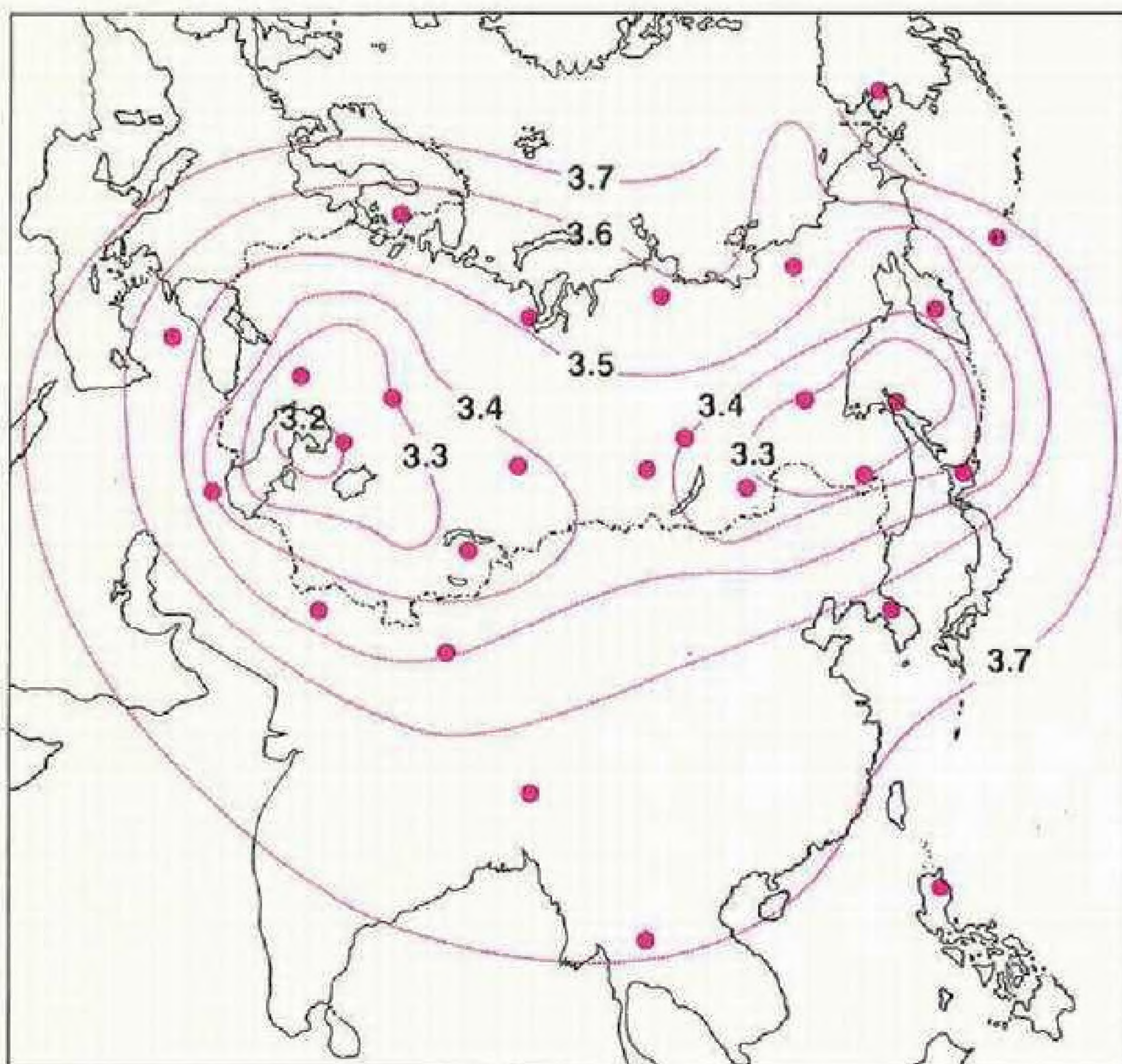
Observaciones realizadas en el polígono de pruebas de Nevada, donde tienen los Estados Unidos el banco de experimentación de su armamento nuclear, muestran que existe una correlación lineal entre el logaritmo de la potencia del explosivo y los valores de las magnitudes M_S y m_b, para las explosiones de más de 100 kilotones de potencia. Pero cuando se cotejan los valores M_S y m_b medidos en las explosiones del polígono de pruebas soviético –en las proximidades de Semipalatinsk– con las fórmulas empleadas en su homónimo norteamericano, se advierte que la potencia dada por m_b cuadriplica, por lo menos, los obtenidos con M_S. Para las explosiones en roca dura, en distintos polígonos de pruebas, los valores que se estiman de la potencia a partir de la fórmula M_S norteamericana concuerdan invariablemente con las potencias reales, mientras que los cálculos fundados en la fórmula m_b estadounidense ofrecen, con frecuencia, un llamativo desacuerdo con la potencia real.

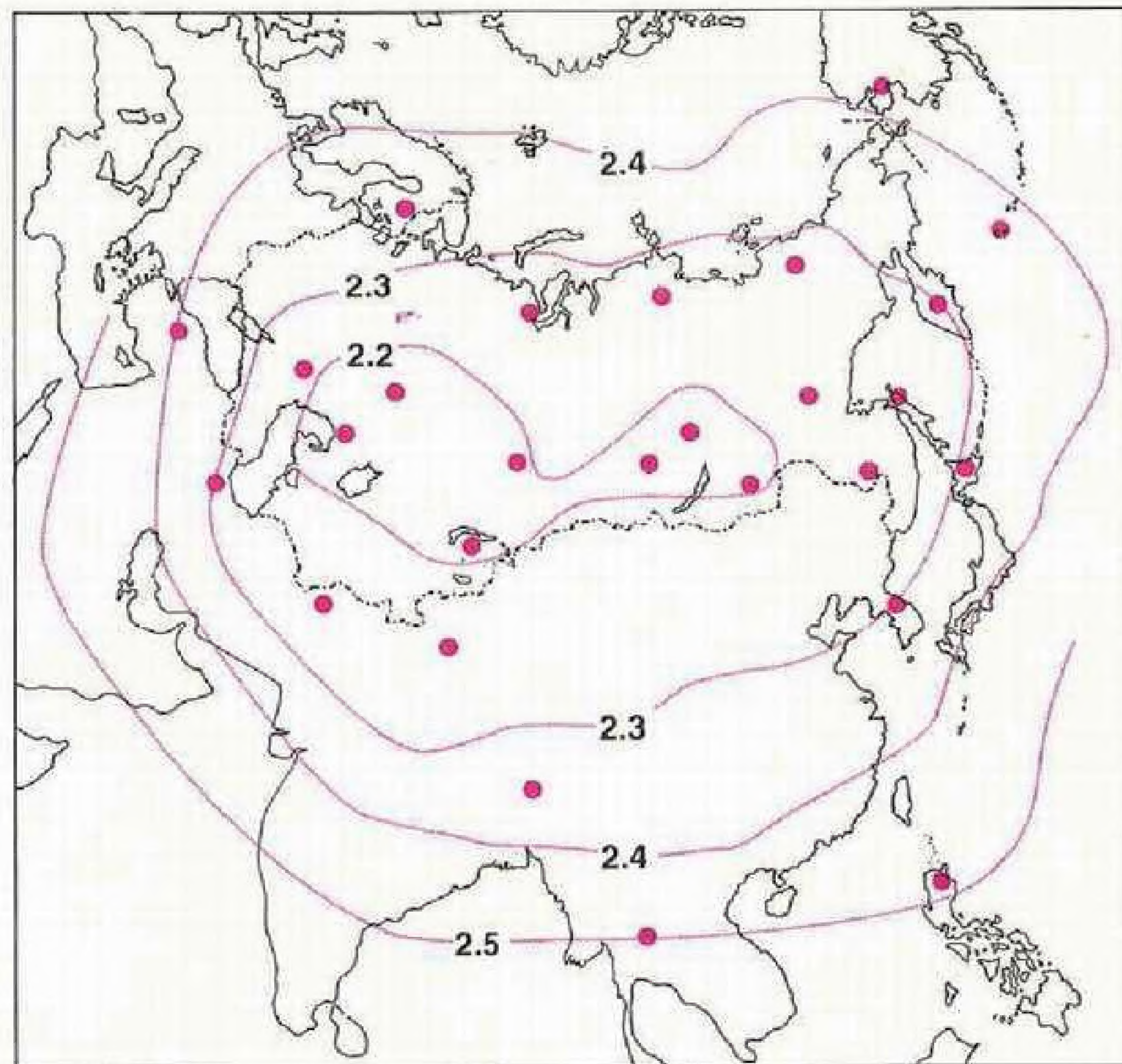
Se ha observado una estrecha correlación entre los valores de m_b medidos en distintas estaciones y los tiempos invertidos por las ondas *P* hasta llegar a las mismas. La Unión Soviética publica periódicamente boletines sismológicos que recogen tiempos de llegada de ondas *P* procedentes de terremotos; y es quehacer de mero cálculo determinar los tiempos de llegada a las estaciones de Asia Central en términos de la pauta que presentarán los valores de m_b en las inmediaciones de Semipalatinsk. Del análisis de las señales de las ondas *P* podemos inferir que los valores de m_b, para una explosión provocada en Semipalatinsk, serán, en 0,4 unidades, mayores que los que asignaremos a una explosión pareja que se experimente en Nevada. Se trata de la





UMBRALES DE DETECCION de los seísmos que se producen en el hemisferio norte, delimitados por las dos series de perfiles dibujadas en este par de mapas. Corresponden a la red propuesta de 15 estaciones sísmicas establecidas fuera de la frontera soviética. Los puntos de color señalan la ubicación de 12 de las 15 estaciones en cuestión; tres quedan fuera del mapa. El número de cada perfil representa que un episodio de esa magnitud, o más intenso, tiene una probabilidad mínima del 90 por ciento de que lo detecten cuatro o más estaciones. Los perfiles del mapa de la izquierda definen los umbrales de detección para las ondas internas de período corto y, los del mapa de la derecha, los umbrales de detección para las ondas superficiales de período largo. En esos mapas y en los de la figura siguiente el único ruido sísmico introducido es el que causan los microseísmos generados por la atmósfera y los océanos.





UMBRALES DE DETECCION REFINADOS para episodios sísmicos que se produzcan en el hemisferio este, delimitados por los dos conjuntos de perfiles dibujados en este par de mapas. Corresponden a la red propuesta de 30 estaciones sísmicas: 15 fuera de la Unión Soviética y otras 15 en su territorio. Por lo que concierne a la mayor parte del estado soviético, la adición de 15 estaciones interiores supondría rebajar el umbral de detección de las ondas interiores de período corto desde la magnitud de 3,8 hasta la de 3,4 (*izquierda*). El efecto para las ondas superficiales de largo período significaría rebajar el umbral desde una magnitud de 2,6 hasta otra de 2,3 (*derecha*). Las estaciones interiores podrían suministrar también información más precisa del foco.

misma corrección que hemos de aplicar a la curva que relaciona m_b con la potencia en el polígono de Nevada y hacer así que los cálculos de la potencia de las explosiones soviéticas sean coherentes con los cálculos de M_S. Dos tipos de análisis distintos nos han llevado, pues, a la conclusión de que existe una relación universal entre M_S y la potencia, en tanto que resulta obligado calibrar, para cada polígono de pruebas, la curva que relaciona m_b con la potencia.

Un tratado ilimitado e incondicional ofrecería una nueva ventaja sobre el que se firmara ateniéndose a los umbrales bajos: todas las dudas técnicas laborarían contra el posible infractor. La nación que proyectara una prueba nuclear clandestina desconocería la capacidad exacta de detección de seísmos en manos de los otros países, ni sabría la magnitud precisa de las ondas sísmicas que desencadenaría su ensayo. Y habría, además, una razón política de peso: la prohibición incondicional de cualquier explosión nuclear llevaría aparejada la idea de que las armas nucleares, sin consideraciones de potencia, aparecerían como grupo distinto del armamento convencional.

No está de más reflexionar cuán distinta sería la historia reciente y la situación actual del mundo si en 1963 se hubiera logrado un acuerdo sobre prohibición absoluta de cualquier prueba. Los arsenales militares han crecido vertiginosamente desde entonces, y se estima hoy que hay de 50.000 a 100.000 cabezas nucleares. Las pérdidas de vidas humanas y el daño social que causaría un conflicto de grandes proporciones serían inmensamente mayores que el que suponía la situación de 1963. Nunca se han sentido los Estados Unidos y Rusia tan inseguros como en nuestros días, y no precisamente por una incapacidad de desarrollar la industria armamentística; antes bien, por culpa de los arsenales nucleares en continua expansión y por la imposibilidad en que se encontraría cualquier nación de hacer frente a un ataque nuclear.

El acuerdo sobre la prohibición absoluta de pruebas no debe entenderse como sustituto del desarme. Una reducción eficaz de la amenaza nuclear ha de comprender un proceso serio e incesante de control de armas nucleares. De cuyo desarrollo el tratado sobre prohibición absoluta constituiría una parte importante. Pero los problemas implicados en la negociación de un acuerdo semejante son de orden político, más que técnico, y como tales han de abordarse.

Antes de la suspensión de las negociaciones entre Estados Unidos, Inglaterra y la Unión Soviética, en 1980, se había alcanzado un acuerdo provisional sobre varios puntos. Admitían las tres naciones que un tratado de prohibición debería rechazar todo tipo de pruebas en cualquier medio, se adoptaría una moratoria para las explosiones nucleares de uso pacífico hasta que se hubieran discutido y acordado las bases de permisión, se estipularían las previsiones para la inspección in situ y se reglamentaría el mecanismo de un intercambio internacional de datos sísmicos e instalación de estaciones sísmicas a prueba de cualquier manipulación torcida por cada país en el territorio de los demás. El tratado tendría una duración de tres años, se preveía. Los acuerdos sobre inspección in situ, explosiones con fines pacíficos e instalaciones de control suponían importantes avances. Sería un penoso retroceso para la causa de la seguridad internacional que estos logros, duramente ganados, se echaran ahora a perder.

Durante muchos años, la política oficial de los Estados Unidos ha insistido en la necesidad de una prohibición sin recortes de las pruebas nucleares, siempre que estuviera asegurada su verificación. La política no ha cambiado de signo, en lo fundamental, por la decisión reciente de la administración Reagan de posponer nuevas negociaciones sobre la prohibición de pruebas nucleares. Todo lo contrario. Se ha informado que el gabinete apoya todavía el objetivo último del rechazo absoluto de cualquier ensayo, aunque manifiesta sus dudas de la eficacia y fiabilidad de los métodos de verificación. Como hemos intentado demostrar aquí, no hay razones para tales recelos.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

VERIFICACION DE UNA PROHIBICION ABSOLUTA DE PRUEBAS NUCLEARES

THE GREAT TEST-BAN DEBATE. Herbert F. York en *Scientific American*, vol. 227, n.° 5, págs. 15-23; noviembre, 1972.

NUCLEAR EXPLOSIONS AND EARTHQUAKES: THE PARTED VEIL. Bruce A. Bolt. W. H. Freeman and Company, 1976.

STUDY OF SEISMOLOGICAL EVASION, PART 1: GENERAL DISCUSSION OF VARIOUS EVASION SCHEMES. PART 2: EVALUATION OF EVASION POSSIBILITIES USING NORMAL MICROSEISMIC NOISE. PART 3: EVALUATION OF EROSION POSSIBILITIES USING CODAS OF LARGE EARTHQUAKES. Jack F. Evernden en *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 66, n.° 1, págs. 245-280 (1.ª parte), págs. 281-324 (2.ª parte), febrero, 1976; n.° 2, págs. 549-592 (3.ª parte), abril, 1976.

THE COMPREHENSIVE TEST BAN. Stockholm International Peace Research Institute en *World Armaments and Disarmament: SIPRI Yearbook 1978*. Taylor and Francis Ltd., 1978.

TRIPARTITE REPORT TO THE COMMITTEE ON DISARMAMENT (UNITED NATIONS). En *World Armaments and Disarmament: SIPRI Yearbook 1981*. Taylor and Francis Ltd., 1981.

CALCIO Y TRANSMISION SINAPTICA

MEMBRANE ULTRASTRUCTURE OF THE GIANT SYNAPSE OF THE SQUID *LOLIGO PEALII*. D. W. Pumplin y T. S. Reese en *Neuroscience*, vol. 3, n.° 8, págs. 685-696; agosto, 1978.

PRESYNAPTIC CALCIUM CURRENTS IN SQUID GIANT SYNAPSE. R. Llinás, I. Z. Steinberg y K. Walton en *Biophysical Journal*, vol. 33, págs. 289-321; marzo, 1981.

RELATIONSHIP BETWEEN PRESYNAPTIC CALCIUM CURRENT AND POSTSYNAPTIC POTENTIAL IN SQUID GIANT SYNAPSE. R. Llinás, I. Z. Steinberg y K. Walton en *Biophysical Journal*, vol. 33, págs. 323-351; marzo, 1981.

TRANSMISSION BY PRESYNAPTIC SPIKELIKE DEPOLARIZATION IN THE SQUID GIANT SYNAPSE. R. Llinás, M. Sugimori y S. M. Simon en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 79, n.° 7, páginas. 2415-2419; abril, 1982.

FULGURACIONES SOLARES

SOLAR FLARES. H. J. Smith y E. V. P. Smith. McMillan Co., 1963.

SOLAR FLARES. Z. Svetska. D. Reidel Publishing Co., 1976.

SOLAR FLARES. Dirigido por P. A. Sturrock. Colorado Associated University Press, 1980.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND NATURAL MAN. Margaret Boden. Basic Books, 1977.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE: AN MIT PERSPECTIVE. Patrick Henry Winston y Richard Henry Brown. The MIT Press, 1979.

MACHINES WHO THINK. Pamela McCorduck. W. H. Freeman and Company, 1979.

THE MIND'S I. Douglas R. Hofstadter y Daniel C. Dennett. Basic Books, 1981.

PERSPECTIVES IN COGNITIVE SCIENCE. Dirigido por Donald A. Norman. Ablex Publishing, 1981.

FLUIDOS MAGNETICOS

FERROHYDRODYNAMICS. Joseph L. Neuringer y Ronald E. Rosensweig en *The Physics of Fluids*, vol. 7, n.° 12, págs. 1927-1937; diciembre, 1964.

FLUID DYNAMICS AND SCIENCE OF MAGNETIC LIQUIDS. Ronald E. Rosensweig en *Advances in Electronics and Electron Physics*, vol. 48, págs. 103-199; 1979.

PROCEEDINGS OF THE SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON MAGNETIC FLUIDS. En *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. Mag-16, n.° 2, páginas 171-415; marzo, 1980.

MACAREOS DE MAREA

THE SEVERN BORE. Fred Rowbotham, David & Charles, Newton Abbot, 1964.

BORES, BREAKERS, WAVES AND WAKES: AN INTRODUCTION TO THE STUDY OF WAVES ON WATER. R. A. R. Tricker. American Elsevier Publishing Co., 1965.

THE SEAS IN MOTION. F. G. Walton Smith. Thomas Y. Crowell Co., 1973.

ASI SE FUNDA UNA COLMENA

THE SOCIAL BEHAVIOR OF BEES: A COMPARATIVE STUDY. Charles D. Michener. Harvard University Press, 1974.

THE NEST OF THE HONEY BEE. T. D. Seeley y R. A. Morse en *Insectes Sociaux*, vol. 23, págs. 455-512; 1976.

ECLIPSES HISTORICOS

GROWTH RHYTHMS AND THE HISTORY OF THE EARTH'S ROTATION INTERDISCIPLINARY WINTER CONFERENCE ON BIOLOGICAL CLOCKS AND CHANGES IN THE EARTH'S ROTATION: GEOPHYSICAL AND ASTRONOMICAL CONSEQUENCES, NEWCASTLE-UPON-TYNE, 1974. Dirigido por G. D. Rosenberg y S. K. Runcorn. John Wiley & Sons, Inc., 1975.

APPLICATIONS OF EARLY ASTRONOMICAL RECORDS. F. Richard Stephenson y David H. Clark. Oxford University Press, 1978.

TIDAL FRICTION AND THE EARTH'S ROTATION. Dirigido por P. Brosche y J. Sündermann. Springer-Verlag, 1978.

THE EARTH'S VARIABLE ROTATION: GEOPHYSICAL CAUSES AND CONSEQUENCES. Kurt Lambeck. Cambridge University Press, 1980.

PROCEEDINGS OF A CONFERENCE ON THE ANCIENT SUN. Dirigido por R. O. Pepin, J. A. Eddy y R. B. Merrill. Pergamon Press, 1980.

SOLAR RADIUS VARIATIONS OVER THE PAST 265 YEARS. Ronald L. Gilliland en *The Astrophysical Journal*, vol. 248, n.° 3, 1.ª parte, págs. 1144-1155; septiembre, 1981.

TEMAS METAMAGICOS

ONE BOOK/FIVE WAYS: THE PUBLISHING PROCEDURES OF FIVE UNIVERSITY PRESSES. Prefacio de Joyce Kachergis e introducción por Chandler Grennis. William Kaufmann, Inc., 1978.

THE CONCEPT OF A META-FONT. Donald E. Knuth en *Visible Language*, vol. 16, n.° 1, págs. 3-27; invierno, 1982.

TALLER Y LABORATORIO

COIN SPINNING ON A TABLE. M. G. Olsson en *American Journal of Physics*, vol. 40, págs. 1543-1545; octubre, 1972.

Los autores

LYNN R. SYKES y JACK F. EVERNDEN ("Verificación de una prohibición absoluta de pruebas nucleares") son geofísicos que han dedicado largas horas de su trabajo al estudio de los métodos que permiten distinguir entre explosiones nucleares y terremotos. Sykes ocupa la cátedra Higgins de geología de la Universidad de Columbia y dirige el grupo de investigación sismológica del observatorio de Lamont-Doherty. Comenzó su carrera en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, doctorándose en 1964 por la Universidad de Columbia. Centró su campo de atención en el dominio de las placas tectónicas, especializándose en la estructura de la placa de Asia, que puede convertirse en importante punto de apoyo para el seguimiento del tratado de una prohibición absoluta de cualquier prueba nuclear. Evernden ostenta la jefatura de programas del centro de investigación de seísmos, adscrito al Servicio Geológico de los Estados Unidos. Procede de la Universidad de California en Berkeley.

RODOLFO R. LLINAS ("Calcio y transmisión sináptica") es profesor y secretario del departamento de fisiología y biofísica del Hospital Clínico de la Universidad de Nueva York. Nacido en Colombia, se licenció, en 1959, por la Universidad Pontificia Javeriana. Se traslada entonces a Australia, donde se recibe de doctor, en 1965, por su Universidad Nacional. Ese año se instala en los Estados Unidos para enseñar en la de Minnesota. De 1966 a 1970 pertenece al Instituto de Investigación Biomédica, de la Fundación de Educación e Investigación de la Asociación Médica Americana. En 1970 se le nombra profesor de fisiología y biofísica y jefe de la división de neurobiología de la Universidad de Iowa; en 1976 deja Iowa y accede a sus cargos actuales en el mencionado centro superior neoyorquino. Llinás ha trabajado en la transmisión sináptica y en la evolución del sistema nervioso central.

J. I. GARCIA DE LA ROSA, F. HERRERA CABELLO y MANUEL VAZQUEZ ABELEDO. ("Las fulguraciones solares") son miembros de la sección solar del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). J. I. García de la Rosa se formó en la Universidad de Zaragoza; trabaja en el IAC desde 1979, después de haber obtenido el master de astrofísica en la Universidad de Sussex. Su campo de investigación es la evolución de regiones activas. F. Herrera Cabello, doctor en ciencias físicas y licenciado en ciencias químicas por la Universidad de La Laguna, ha colaborado, de 1958 a 1974, en los siguientes programas de la NASA: Vanguard, Mercury, Gemini, Apolo y Skylab, en el campo de técnicas de seguimiento de vehículos espaciales, comunicaciones y física solar, especialmente análisis de fulguraciones. En 1974 entró en el IAC, donde ha continuado trabajando en este último campo. Manuel Vázquez Abeledo estudió en la Universidad de Madrid, aunque defendió su tesis doctoral en la de La Laguna (Canarias) en 1974. Cuatro años antes había ingresado en el IAC. Se ha centrado en la evolución de regiones activas, rotación diferencial y aspectos solares de la actividad estelar. Es representante de España en la JOSO ("Joint Organization for Solar Observations").

DAVID L. WALTZ ("Inteligencia artificial") enseña ingeniería eléctrica en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Allí también es profesor de investigación del Coordinated Science Laboratory. Se doctoró en el MIT en 1972. Siempre le interesó remedar la actuación del sistema nervioso humano: "entre mis primeras ocupaciones en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT estaba el diseño de un sistema de percepción táctil para manos de robot".

RONALD E. ROSENSWEIG ("Fluidos magnéticos") es investigador y jefe del grupo de física de fluidos de la Compañía Exxon Research and Engineering. Cursó ingeniería química, licenciándose en 1955 por la Universidad de Cincinnati, y doctorándose por el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1959. De 1959 a 1962 enseña en el MIT, trasladándose luego a la Avco Corporation. En 1969 es nombrado presidente y director técnico de Ferrofluidics Corporation. Trabajó en esa compañía, con distintos cargos, hasta su ingreso en la Exxon, en 1973. Su interés científico se centra en los coloides y el estudio de la estabilidad hidrodinámica.

DAVID K. LYNCH ("Macareos de marea") trabaja en los laboratorios de Investigación Hughes de Malibu, California, donde se dedica a la óptica y la holografía. Se licenció por la Universidad de Indiana en 1969, doctorándose en astronomía, en 1975, por la Universidad de Texas en Austin. Antes de trasladarse a Hughes desempeñó funciones de investigación en diversas instituciones, entre ellas el Instituto de Tecnología de California, la Universidad de California en Berkeley y el Observatorio Sacramento Peak.

THOMAS D. SEELEY ("Así se funda una colmena") enseña biología en la Universidad de Yale. Licenciado por el Dartmount College en 1974, en 1978 se doctoró en biología por la Universidad de Harvard. Recibe luego una beca de esa institución que le permite pasar un año en las junglas de las montañas de Thailandia, donde estudió la ecología de las abejas de esa zona. Desde su incorporación a la Facultad de Yale ha investigado especialmente la estrategia general de alimentación de las colonias de abejas. Escribe: "mi interés por las socidades altamente evolucionadas de abejas melíferas refleja mi profundo placer por la observación de individuos (por más que no sean más que insectos) que viven juntos en sociedades armoniosas".

F. RICHARD STEPHENSON ("Eclipses históricos") es profesor de investigación de la Universidad de Durham. Nacido en Inglaterra, cursó el primer ciclo de estudios universitarios en Durham, doctorándose en geofísica por la Universidad de Newcastle upon Tyne. De 1972 a 1979 estuvo becado para investigar en ese centro. En 1979 se traslada a la Universidad de Liverpool, donde trabajó hasta el pasado mes de octubre. Ha prestado particular atención a las observaciones astronómicas del pasado y su aplicación a problemas actuales de astronomía y geofísica. Es coautor, con David H. Clark, de *The Historical Supernovae* (Pergamon Press, 1977) y *Applications of Early Astronomical Records* (Adam Hilger Ltd., 1978). Dice sentir "un profundo reconocimiento de gratitud hacia los astrónomos de las edades antigua y media por los registros que nos han legado".

Número 75
Diciembre 1982

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)